

УДК 620.9

**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ,
ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР: ПРИНЦИП РАБОТЫ, ЭКОНОМИЧЕСКАЯ
ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТАХ****Ширяев Александр Дмитриевич**

Магистрант 1 курса кафедры теплосиловых установок и тепловых двигателей Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.
E-mail: a.d.shiryaev@rambler.ru

Морозов Григорий Алексеевич

Ассистент кафедры теплосиловых установок и тепловых двигателей Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.
E-mail: progsees@yandex.ru

Аннотация

Повышение энергопотребления, связанное с увеличением численности населения и распространения электроники во все сферы жизнедеятельности человека, приводит к более рациональному потреблению доступных энергетических ресурсов и применению альтернативных источников энергии. В данной статье предложено внедрение одного из возможных нетрадиционных источников энергии, а именно термоэлектрогенератора, на теплоэнергетических объектах для увеличения их энергоэффективности. Описан принцип работы ТЭГ и произведен его технико-экономический расчет для оценки целесообразности использования.

Ключевые слова: эффект Зеебека, альтернативная энергетика, термоэлектрогенератор, принцип работы ТЭГ, технико-экономический расчет ТЭГ, экономическая эффективность работы ТЭГ.

**CONVERTER OF THERMAL ENERGY INTO ELECTRICAL ENERGY,
THERMOELECTRIC GENERATORS: PRINCIPLE OF OPERATION,
ECONOMIC FEASIBILITY OF APPLICATION AT THERMAL POWER
FACILITIES****Alexander D. Shiryaev**

1st year master's student of the Department of Thermal Power Plants and Heat Engines of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg, Ivan Chernykh str., 4.
E-mail: a.d.shiryaev@rambler.ru

Grigory A. Morozov

Assistant of the Department of Heat Power Plants and Heat Engines of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg, Ivan Chernykh str., 4.

E-mail: progsees@yandex.ru

ABSTRACT

The increase in energy consumption associated with an increase in the population and the spread of electronics in all spheres of human activity leads to a more rational consumption of available energy resources and the use of alternative energy sources. This article proposes the introduction of one of the possible unconventional energy sources, namely a thermoelectric generator, at thermal power facilities to increase their energy efficiency. The principle of operation of the TAG is described and its technical and economic calculation is made to assess the feasibility of use.

Keywords: Seebeck effect, alternative energy, thermoelectric generator, principle of operation of TEG, technical and economic calculation of TEG, economic efficiency of TEG.

Термоэлектрические явления, то есть явления, вызванные взаимосвязью между тепловыми и электрическими процессами в проводниках, изучаются уже более 250 лет. Первооткрывателем термоэлектрического явления считается французский физик, автор трудов по термоэлектричеству, электромагнетизму и метеорологии Жан Шарль Пельтье. Первые термоэлектрические батареи (ТЭБ) изготовили в 1823 году Эрстед и Фурье, установки имели очень низкий коэффициент полезного действия (менее 1%). Однако исследования, которые проводились в Ленинградском физико-техническом институте под руководством А.Ф. Иоффе, позволили повысить КПД [1].

В термоэлектрических генераторах (ТЭГ) происходит преобразование тепловой энергии в электрическую, основанное на эффектах Зеебека, Пельтье и Томсона.

Эффект Зеебека (термоэлектрический эффект) – явление возникновения ЭДС на концах последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми находятся при различных температурах.

Эффект Пельтье – термоэлектрическое явление охлаждения одного контакта (спая) и нагрев другого контакта при прохождении электрического тока в цепи, состоящей из двух разнородных проводников.

Эффект Томсона – термоэлектрическое явление выделения или поглощения тепловой энергии при прохождении постоянного электрического тока в цепи, состоящей из однородного материала, имеющего разность температур по своей длине.

В качестве источника тепла в термоэлектрических преобразователях возможно использование отработавших газов двигателей внутреннего сгорания, промышленных предприятий и электростанций, органического и ядерного топлива, солнечной энергии, радиоактивных изотопов, геотермальное тепло и др.

Как правило, термоэлектрогенератор состоит из источника тепла, термоэлектрического преобразователя и холодильника. Тепло от источника может передаваться напрямую к преобразователям, либо с помощью контура теплоносителя. Термоэлектрический преобразователь состоит из термоэлектрических батарей, которые

соединены в последовательно-параллельную электрическую цепь, где часть тепловой энергии превращается в электрическую, а отработавшее тепло поступает в холодильник и сбрасывается во внешнюю среду. ТЭБ komponуются термоэлементами, которые состоят из двух ветвей (термостолбиков), изготовленных из полупроводниковых сплавов р- и n-типов проводимости. Термостолбики последовательно соединяются металлическими шинами так, что в ветвях р-типа направление электрического тока – от горячего спая к холодному, а в ветвях n-типа направление тока – от холодного спая к горячему.

Преимуществом термоэлектрических генераторов является отсутствие движущихся механизмов, что приводит к достаточно долгому периоду работы установок в необслуживаемом режиме. Однако ТЭГ имеют относительно низкий коэффициент полезного действия и высокую стоимость, поэтому применяются в местах, где нет другого источника энергии, либо необходима длительная, надежная и автономная работа, например, в космосе, а также применение термоэлектродгенераторов возможно в процессах, где имеется избыток тепловой энергии.

На данный момент существуют сотни сплавов и соединений веществ, которые имеют термоэлектрические свойства, но для ТЭГ возможно использование всего нескольких полупроводниковых термоэлектрических материалов. По температурному диапазону их можно разделить на три группы [1]:

1. Низкотемпературные материалы (до 450 К) – сплавы на основе висмута в сочетании с сурьмой, теллуром, селеном.
2. Среднетемпературные (до 850 К) – материалы на основе сплавов свинца.
3. Высокотемпературные материалы (до 1300 К) – материалы на основе сплавов кремний-германий.

Для оценки эффективности работы термоэлектрической энергетики в качестве примера были использованы низкотемпературные термогенераторные модули ТГМ-127-2.0-1.3 производством компании «Криотерм», характеристики которых приведены в таблице 1 [2].

Таблица 1 – Технические характеристики термоэлектрического модуля ТГМ-127-2.0-1.3

Генерируемая мощность (при температурах холодной стороны 30 °С и горячей 200 °С)	12,6 Вт
КПД	4,7%
Рабочая температура	200°С
Максимальная рабочая температура	220°С
Размеры (АхВхН)	48х48х3,6 мм
Электрическое сопротивление в условиях эксплуатации	0,75 Ом
Тепловое сопротивление	0,69 К/Вт
Материал керамических пластин	Al ₂ O ₃
Напряжение на выходе модуля	3,1 В
Электрический ток через нагрузку	4,1 А
Количество термоэлектрических пар в модуле	127 шт.
Стоимость	2178 руб./шт.

Стоимость установленной мощности за 1 кВт электрической энергии, выработанной термоэлектрогенератором, находится в большом диапазоне, а именно составляет 100 тыс. рублей - 600 тыс. рублей. Данную стоимость можно значительно уменьшить, если повысить уровень конструкторских разработок и запустить серийное производство термоэлектрогенераторов. Снижение возможно до 32 тыс. рублей за 1 кВт установленной мощности [3].

Источником тепловой энергии для термоэлектрической станции на базе термоэлектрических модулей ТГМ-127-2.0-1.3 могут быть уходящие газы на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ). В качестве примера такого источника была выбрана ТЭЦ-21 с установленной электрической и тепловой мощностями 500 МВт и 1208 Гкал/ч, расположенная по адресу Ленинградская область, Всеволожский район, поселок Новое Девяткино, улица Озерная, дом 5 [4].

В этом случае подводимый тепловой поток уходящими газами с температурой 115°C из котельного агрегата поступит в ТЭГ, где произойдет преобразование тепловой энергии в постоянный электрический ток. Чем больше будет разница температур между горячей стороной ТЭГ и холодной стороной, тем больше будет вырабатываться электрической энергии. При проектировании термоэлектрогенератора необходимо учитывать снижение температуры проходящих через него дымовых газов, чтобы избежать появления низкотемпературной коррозии.

Для преобразования постоянного электрического тока в переменный используется инвертор, для накопления электрической энергии, если возникала такая необходимость, возможно применение аккумуляторов.

Расход уходящих газов в течение года меняется, следовательно, и подводимый тепловой поток является непостоянной величиной, поэтому технико-экономический расчет ТЭГ проводился по месяцам [5].

1) Подводимый тепловой поток в январе:

$$Q = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot T = 6,83 \cdot 0,9197 \cdot 1,0724 \cdot 388 = 2613,7 \text{ кВт},$$

где V - расход газа, м³/с;

ρ - плотность дымовых газов при температуре 115°C, кг/м³;

c_p - теплоемкость дымовых газов при температуре 115°C, кДж/(кг · К);

T - температура дымовых газов, К.

Аналогичным образом высчитывается подводимый тепловой поток для других месяцев (табл.2).

2) Отношение площадей поперечного сечения ветвей n- и p-типов:

$$\gamma = \sqrt{\frac{\rho_n \cdot x_p}{\rho_p \cdot x_n}} = \sqrt{\frac{38 \cdot 10^{-4} \cdot 1,7 \cdot 10^{-2}}{12,2 \cdot 10^{-4} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}}} = 1,455,$$

где ρ_n и ρ_p - среднеинтегральные удельные электрические сопротивления, Ом · см;

x_p и x_n - среднеинтегральные коэффициенты теплопроводности, Вт/(см · К).

3) Средний коэффициент термоЭДС:

$$\alpha = \frac{\alpha_p + \alpha_n}{2} = \frac{1,85 \cdot 10^{-4} + 2,8 \cdot 10^{-4}}{2} = 2,325 \cdot 10^{-4} \text{ В/К},$$

где α_p и α_n - среднеинтегральные термоЭДС, В/К.

4) Средний коэффициент теплопроводности:

$$x = \frac{x_p + \gamma \cdot x_n}{1 + \gamma} = \frac{1,7 \cdot 10^{-2} + 1,455 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}}{1 + 1,455} = 2,174 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(см · К)},$$

где x_p и x_n - среднеинтегральные коэффициенты теплопроводности, Вт/(см · К);

γ - отношение площадей поперечного сечения ветвей n- и p-типов.

5) Среднее удельное электрическое сопротивление:

$$\rho = \frac{1 + \gamma}{4} \cdot \left(\rho_p + \frac{1}{\gamma} \cdot \rho_n \right),$$

$$\rho = \frac{1+1,455}{4} \cdot \left(12,2 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{1,455} \cdot 38 \cdot 10^{-4}\right) = 23,517 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см},$$

где ρ_n и ρ_p – среднеинтегральные удельные электрические сопротивления, Ом · см;

γ – отношение площадей поперечного сечения ветвей n- и p-типов.

6) Добротность:

$$z = \frac{\alpha^2}{x \cdot \rho \cdot (1+\epsilon_x) \cdot (1+\epsilon_p)}$$

$$z = \frac{2,325 \cdot 10^{-4^2}}{2,174 \cdot 10^{-2} \cdot 23,517 \cdot 10^{-4} \cdot (1+5 \cdot 10^{-2}) \cdot (1+6 \cdot 10^{-2})} = 9,5 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1},$$

где α – средний коэффициент термоЭДС, В/К;

x – средний коэффициент теплопроводности, Вт/(см · К);

ρ – среднее удельное электрическое сопротивление, Ом · см;

ϵ_x – коэффициент, учитывающий утечки тепла по защитным покрытиям и элементам конструкции;

ϵ_p – коэффициент, учитывающий электрические сопротивления переходных слоев, коммутирующих шин и контактов.

7) Средняя температура:

$$T_{cp} = \frac{T+T_0}{2} = \frac{388+303}{2} = 345,5 \text{ К},$$

где T – температура горячего спая, К;

T_0 – температура холодного спая, К.

8) Перепад температуры:

$$\Delta T = T - T_0 = 388 - 303 = 85 \text{ К},$$

где T – температура горячего спая, К;

T_0 – температура холодного спая, К.

9) Коэффициент нагрузки:

$$M = \sqrt{1 + z \cdot T_{cp}} = \sqrt{1 + 9,5 \cdot 10^{-4} \cdot 345,5} = 1,152,$$

где z – добротность, К^{-1} ;

T_{cp} – средняя температура, К.

10) КПД термоэлементов:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T} \cdot \frac{M-1}{M+\frac{T_0}{T}} = \frac{85}{388} \cdot \frac{1,152-1}{1,152+\frac{303}{388}} = 0,017 (1,7\%),$$

где T – температура горячего спая, К;

T_0 – температура холодного спая, К;

ΔT – перепад температуры, К;

M – коэффициент нагрузки.

11) Выходная электрическая мощность в январе:

$$N = Q \cdot \eta = 2613,7 \cdot 0,017 = 44,43 \text{ кВт},$$

где Q – подводимый тепловой поток, кВт;

η – КПД термоэлементов.

Аналогично находится выходная электрическая мощность за другие месяцы (см. таблицу 2).

12) Выработка электрической энергии термоэлектрогенератором в январе:

$$W_m = N \cdot T = 44,43 \cdot 744 = 33056 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где N – выходная электрическая мощность, кВт;

T – время работы термоэлектрогенератора, час.

Количество вырабатываемой электроэнергии в остальные месяцы и годовая выработка рассчитываются аналогичным образом (табл. 2).

Таблица 2 – Расчет месячной и годовой выработок электрической энергии ТЭГ

Месяц	n, дни	V, м ³ /с	Q, кВт	N, кВт	W _м , кВт·ч
Январь	31	6,83	2613,7	44,43	33056
Февраль	28	6,41	2454,7	41,73	28043
Март	31	9,11	3486,2	59,27	44097
Апрель	30	7,69	2942,8	50,03	36022
Май	31	3,08	1178,7	20,04	14910
Июнь	30	7,15	2736,2	46,52	33494
Июль	31	7,24	2770,6	47,10	35042
Август	31	4,38	1676,1	28,49	21197
Сентябрь	30	5,46	2089,4	35,52	25574
Октябрь	31	8,43	3226,0	54,84	40801
Ноябрь	30	8,63	3302,5	56,14	40421
Декабрь	31	6,09	2330,5	39,62	29477
Всего	365	-	-	-	382134

13) Срок окупаемости:

$$T = \frac{C}{W_{\Gamma} \cdot C_{\text{кВт}\cdot\text{ч}}},$$

$$T = \frac{21000000}{382134 \cdot 4} = 14 \text{ лет},$$

где W_{Γ} – годовая выработка электроэнергии, кВт·ч;

C – цена реализации, руб.;

$C_{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$ – стоимость 1 кВт·часа электрической энергии в г. Санкт-Петербурге, руб./кВт·

ч.

14) Себестоимость 1 кВт·часа электрической энергии, вырабатываемой ТЭГ:

$$S = \frac{C}{W_{\Gamma}} = \frac{21000000}{382134} = 54,95 \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч},$$

где W_{Γ} – годовая выработка электроэнергии, кВт·ч;

C – цена реализации ТЭГ, руб.

По данным таблицы 2, произведено построение графика зависимости вырабатываемой электрической энергии термоэлектрогенератором на базе термоэлектрического модуля ТГМ-127-2.0-1.3 от времени года (рис. 1).

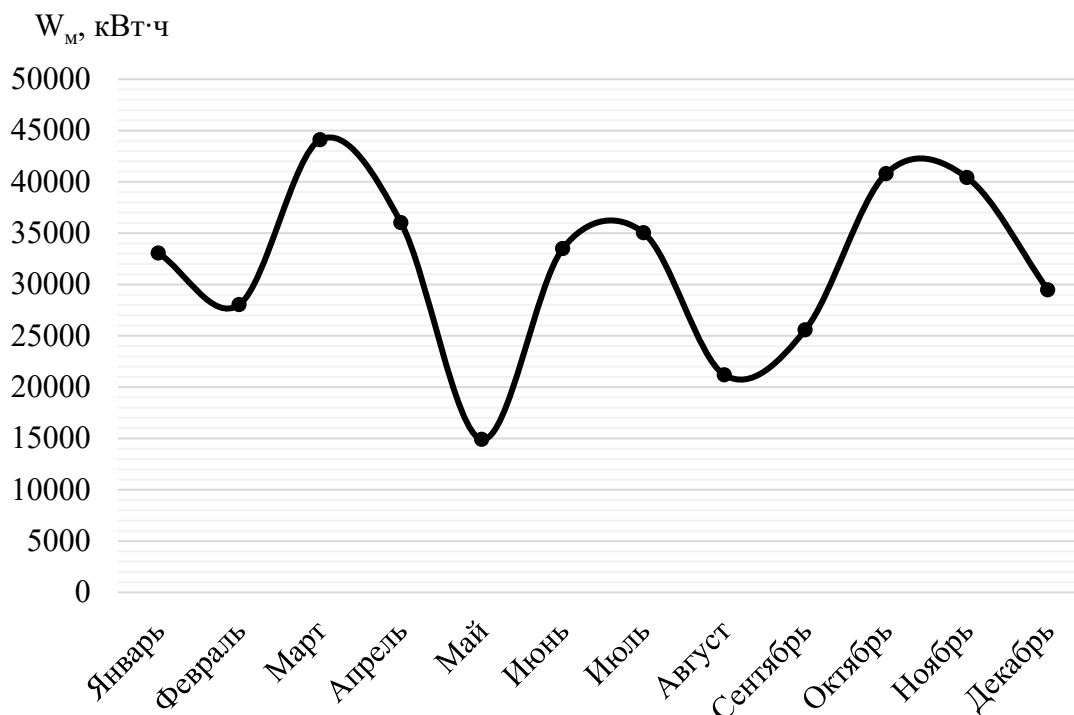


Рисунок 1 – Количество вырабатываемой электроэнергии ТЭГ по месяцам

По результатам расчета видно, что в настоящее время применение термоэлектродгенераторов на теплоэнергетических объектах возможно, однако с экономической точки зрения является неэффективным, так как средняя стоимость 1 кВт · часа электрической энергии у ТЭГ составляет 54,95 руб./кВт · ч, что в 20-25 раз больше, чем у традиционных источников (средняя стоимость 1 кВт · часа электрической энергии ТЭЦ – 1,94 руб./кВт · ч) [6]. Однако при увеличении стоимости топлива ситуация может измениться, и альтернативные источники электрической энергии смогут стать экономически наиболее выгодными. К тому же сейчас ведутся работы, связанные с увеличением коэффициента полезного действия ТЭГ и уменьшением их стоимости. Новые материалы с низкой теплопроводностью и высокой электропроводностью, которые находятся в разработке, позволяют повысить эффективность устройств, сделав термоэлектрическую энергию альтернативой солнечной и ветряной.

Список литературы:

1. Поздняков Б.С., Коптелов Е.А. Термо-электрическая энергетика / Б.С. Поздняков, Е.А. Коптелов. – М.: Атомиздат, 1974. – 264 с.
2. Термоэлектрические модули // URL: <https://clck.ru/sYjEd> (дата обращения: 10.07.2022).
3. Злобин В. Г., Липатов М. С. Специальные главы технической термодинамики: учеб. пособие / В.Г. Злобин, М.С. Липатов. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 192 с.
4. Северная ТЭЦ // URL: <https://clck.ru/sYjFg> (дата обращения: 10.07.2022).
5. Марченко О.В., Кашин А.П., Лозбин В.И., Максимов М.З. Методы расчета термоэлектрических генераторов / О.В. Марченко, А.П. Кашин, В.И. Лозбин, М.З. Максимов. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. – 222 с.

6. Липатов, М. С. Повышение эффективности источников теплоснабжения / М. С. Липатов // Энергетика и автоматизация в современном обществе : Материалы II Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 06 ноября 2018 года / Под редакцией Т.Ю. Коротковой. – Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. – С. 81-83.

References:

1. Pozdnyakov B.S., Koptelov E.A. Thermo-electric power engineering / B.S. Pozdnyakov, E.A. Koptelov. – М.: Atomizdat, 1974. – 264 p.
2. Thermoelectric modules // URL: <https://clck.ru/sYjEd> (date of reference: 10.07.2022).
3. Zlobin V. G., Lipatov M. S. Special chapters of technical thermodynamics: textbook. manual / V.G. Zlobin, M.S. Lipatov. – St. Petersburg: SHTE SPbGUPTD, 2021. – 192 p.
4. Severnaya CHPP // URL: <https://clck.ru/sYjFg> (accessed: 10.07.2022).
5. Marchenko O.V., Kashin A.P., Lozbin V.I., Maksimov M.Z. Methods of calculation of thermoelectric generators / O.V. Marchenko, A.P. Kashin, V.I. Lozbin, M.Z. Maksimov. – Novosibirsk: Nauka. Siberian Publishing Company of the Russian Academy of Sciences, 1995. – 222 p.
6. Lipatov, M. S. Improving the efficiency of heat supply sources / M. S. Lipatov // Power engineering and automation in modern society : Materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 06, 2018 / Edited by T.Y. Korotkova. – St. Petersburg: HSE SPbGUPTD, 2018. – pp. 81-83.